

17. Книжник, А. В. Исследование МГД-стабильности электролизёра ОА-300 [Текст] : сб. научн. статей / А. В. Книжник, Ю. В. Богданов, А. А. Кузаков, Е. Ю. Радионов. – Аллюминий Сибири. – Красноярск, 2007.
18. Renbijun, A. Research of Fuzzy Control for Alumina in Henan Hongkong Longquan Aluminum Co. LTD., China [Text] / A. Renbijun // Light Metals. – 2007. – Vol. 4. – P. 439–442.
19. Berezin, A. I. Neural Network Qualifier of Noises of Aluminium Reduction Cell [Text] / A. I. Berezin, P. V. Poliakov, O. O. Rodnov // Light Metals. – 2003. – Vol. 4. – P. 437–442.
20. Кирко, И. М. Магнитная гидродинамика: современное видение проблем [Текст] / И. М. Кирко, Г. Е. Кирко. – Москва: Ижевск: Регуляр. и хаот. динамика: Ин-т компьютер. исслед., 2009. – 630 с.

**Запропонована підтримка співвідношення виробництва та споживання електричної енергії та теплоти на основі технологічної системи виробництва та споживання біогазу, основу якої складає інтегрована динамічна підсистема з використанням біогазової установки та теплонасосного енергопостачання, когенераційної установки та електроакумуляування. Прийняття рішень на підтримку процесу зброджування, відвантаження збродженого сусла та завантаження свіжої сировини та електроакумуляування на основі прогнозування зміни параметрів технологічного процесу дозволяє підвищити товарність біогазової установки та знизити собівартість виробництва енергії та шкідливі викиди двоокису вуглецю до 10–15 %**

**Ключові слова:** технологічна система, біогазова установка, теплонасосна система, когенераційна установка, електроакумуляування, прийняття рішень

**Предложена технологическая система производства и потребления биогаза, основу которой составляет интегрированная динамическая подсистема с использованием биогазовой установки и теплонасосного энергоснабжения, когенационной установки и электроаккумуляирования. Принятие решений на поддержание процесса сбраживания, отгрузку сброженного сусла и загрузку свежего материала, электроаккумуляирования на основе прогнозирования параметров технологического процесса позволяет повысить товарность биогазовой установки и снизить себестоимость производства энергии и вредные выбросы двуокиси углерода до 10–15 %**

**Ключевые слова:** технологическая система, биогазовая установка, теплонасосная система, когенерационная система, электроаккумуляирование, принятие решений

УДК 621.182.2.001.57

## ТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА ВИРОБНИЦТВА ТА СПОЖИВАННЯ БІОГАЗУ

**Є. Є. Чайковська**

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент  
Кафедра теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики  
Одеський національний політехнічний університет  
пр. Шевченка, 1, м. Одеса,  
Україна, 65044

E-mail: eechaikovskaya@gmail.com

### 1. Вступ

В умовах ресурсо та енергозбереження однією з головних переваг когенераційних технологій щодо здобуття як електроенергії, так і теплоти на основі одного первинного джерела енергії є можливість використання біогазу на основі переробки біологічних відходів [1]. Метанове зброджування щодо здобуття біогазу як нетрадиційного джерела енергії потребує спеціальних умов щодо підтримки життєдіяльності складного комплексу мікроорганізмів в анаеробних умовах під дією мікрофлори. Особливого значення набуває виробляюча активність процесів анаеробного зброджування, підтримка якої впливає на якісну та кількісну віддачу метантенка. Більш того, виникає необхідність в забезпеченні товарності біогазової установки при урахуванні втрат енергії в навколишнє середовище,

на підігрів субстрату до температури зброджування та його перемішування. Когенераційні технології, що використовують первинний двигун, електрогенератор, систему утилізації теплоти, систему контролю й управління дозволяють включати до технологічних схем різноманітні енергетичні установки: поршневі двигун, газову турбіну, парову турбіну чи комбінацію парової та газової турбін. Однак, умови когенерації при використанні біогазу ускладнені не тільки незбігом споживання електричної енергії та теплоти, а й непостійним виходом біогазу, що потребує додаткових баків для збродженої сировини, додаткових ємностей газгольдерів, значних витрат теплоти на підтримку процесу зброджування за рахунок виробленої енергії, т.ін. Збитковість же виробництва електроенергії в години найменшого споживання не дозволяє використання когенераційних установок в повній мірі.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Статичні методи оптимізації енергетичних систем – економічний, ексергетичний, термoeкономіки дозволяють визначати оптимальні умови їх експлуатації без оцінки зміни теплової акумулюючої ємності, що ускладнює узгодження виробництва та споживання енергії в реальних умовах функціонування енергетичних систем, у тому числі й на рівні виробництва та споживання біогазу. Для термостабілізації та інтенсифікації теплообміну в біореакторах запропоновано, наприклад, удосконалити їх конструктивні параметри [2]. На основі визначення режимних параметрів, що впливають на вихід біогазу, наведено дерево логічного висновку, здобуті результати експериментальних досліджень та видані рекомендації щодо автоматичного управління реактором, але на основі вимірювання температури зброджування сировини, що має не завжди достовірне використання для впливу на зміну витрати суслу у зв'язку із значною тепловою акумулюючою ємністю сировини. Більш того, таке рішення може порушити необхідний баланс свіжої та збродженої сировини [3]. В роботі [4] розглянуто головні особливості нестационарних процесів теплообміну в біореакторах та запропоновано математичну модель щодо оцінки зміни температури зброджування за часом, без урахування її зміни в об'ємі біореактора, що ускладнює встановлення енергозберігаючих режимів функціонування біогазової установки при зміні якості сировини, її температури, т. і. Так, в роботі [5] представлено методику ексергетичного аналізу схем біогазових установок з урахуванням споживання біогазу, виконано зіставлення параметрів циклів установок і наведено аналіз ексергетичних характеристик газотурбінної установки, парогазової установки зі скиданням газів у котел і парогазової установки з високотемпературним парогенератором і проміжним перегрівом. Зроблено висновок, що цикл біогазової установки з проміжним перегрівом пари та використанням високонапірного парогенератора є найбільш ефективним за ексергетичними показниками. На основі статичної оцінки параметрів технологічного процесу когенерації не завжди можливо забезпечити підтримку співвідношення виробництва електричної енергії та теплоти в складних умовах не збігу їх споживання, особливо при складності забезпечення стабільності виходу біогазу. Тому з цієї ціллю використовують ускладнені теплові схеми за рахунок встановлення додаткових теплообмінників, теплоаккумуляторів. Так, в роботі [6] проведено ексергетичний аналіз на основі визначення ексергетичних втрат в елементах когенераційної установки. Розглянуто різні схеми когенераційних установок. При проведенні ексергетичного аналізу прийнято допущення щодо функціонування когенераційної системи за електричним чи тепловим графіком навантаження без узгодження із споживанням. Так, в роботі [7] запропоновано регулювання співвідношення виробництва теплоти та електричної енергії з використанням теплоаккумулятора, що на основі розробленого алгоритму вдовольняє навантаження опалення в години найменшого споживання електроенергії з ціллю зниження її виробництва, але без узгодження із споживанням теплоти.

Для підтримки функціонування когенераційних систем з використанням біогазу необхідно здобути функціональну оцінку співвідношення виробництва та споживання енергії в єдиному інформаційному просторі для можливості прогнозування зміни параметрів технологічного процесу, а не ліквідації наслідків їх зміни [8].

## 3. Ціль та задачі дослідження

Ціллю роботи є розробка методу інтегрованого прийняття рішень на підтримку співвідношення виробництва та споживання електричної енергії та теплоти з використанням біогазу.

Відповідно до поставленої цілі поставлені наступні задачі дослідження:

- провести аналіз оптимізації когенераційних технологій з використанням біогазу та обґрунтування необхідності функціональної оцінки співвідношення між виробництвом та споживанням енергії;
- запропонувати архітектуру технологічної системи, основу якої складає інтегрована динамічна підсистема, що включає біогазову установку, тепловий насос, когенераційну установку, акумуляторну батарею та теплоелектроаккумулятор;
- виконати математичне моделювання динаміки біогазової установки, випарника, компресора, конденсатора теплового насоса, електроаккумулятора та теплоелектроаккумулятора;
- виконати контроль працездатності та ідентифікацію стану біогазової установки, систем: випарник – компресор, компресор – конденсатор теплового насоса та контроль працездатності та ідентифікацію стану електроаккумулятора та теплоелектроаккумулятора щодо здобуття інформації на рівні прийняття рішень;
- розробити метод інтегрованого прийняття рішень на підтримку співвідношення виробництва та споживання енергії у складі запропонованої технологічної системи.

## 4. Підтримка співвідношення виробництва та споживання електроенергії та теплоти на рівні прийняття рішень

У зв'язку із тим, що однією з головних властивостей енергетичних систем є їх обов'язковий обмін з оточуючим середовищем речовиною, енергією й інформацією запропоновано архітектуру технологічних систем, основою якої є динамічна підсистема – енергетична система. Представлено методологічне та математичне обґрунтування запропонованої архітектури щодо можливості визначення нових властивостей елементів технологічної системи. З цієї ціллю представлено методологію математичного опису динаміки енергетичних систем відносно істотних параметрів, що діагностуються, де зміна параметрів представлена як у часі, так і вздовж просторової координати осі теплообмінника, що співпадає з напрямом руху потоку середовища. Для виконання динамічної підсистемою функцій контролю працездатності й ідентифікатора

стану енергетичної системи розроблено метод графа причинно-наслідкових зв'язків. Представлено термодинамічне обґрунтування допуску як структури та принципу інтелектуального управління тепломасообмінними процесами. Наведено приклади підтримки функціонування енергетичних систем та енергозберігаючих технологій на рівні прийняття рішень [8].

Для можливості регулювання співвідношення виробництва теплоти та електричної енергії з використанням біогазової установки необхідно здобути прогноуючу аналітичну оцінку зміни температури зброджування на основі оцінки зміни теплової акумулюючої ємності суслу з використанням вимірювання температури теплоносія, що гріє на виході із теплообмінника для підігріву субстрату, що змінюється за часом раніше, ніж температура зброджування. Такий підхід надасть можливість використання відвантаженого суслу у якості низькопотенційного джерела енергії у тепловому насосі щодо встановлення обов'язкових балансів свіжої та збродженої сировини. Підтримка процесу зброджування без витрат виробленої теплоти та забезпечення постійного виходу біогазу дозволить акумулювати електроенергію та теплоту щодо забезпечення як власних потреб біогазової установки, так і споживання.

Так, на основі методологічного та математичного обґрунтування архітектури технологічних систем запропонована технологічна система здобуття біогазу, основою якої є динамічна підсистема – біогазова установка, що знаходиться в узгодженій взаємодії з блоками: підтримки динамічної рівноваги процесу зброджування з ціллю оцінки зміни теплової акумулюючої ємності сировини, зміни режимних умов для підтримки безперервності технологічного процесу та функціональної оцінки ефективності біогазової установки. Запропонована технологічна система на основі прогнозування зміни температури зброджування дозволяє підтримувати динамічну рівновагу процесу зброджування за рахунок відключення при розряді чи включення при заряді секцій теплообмінника для підігріву субстрату, вбудованого в метантенк, що збільшує економію умовного палива за рахунок використання енергії теплової акумуляції суслу в повній мірі. Використано вимірювання температури теплоносія, що гріє на виході із теплообмінника, яка змінюється за часом раніше, ніж температура зброджування [9].

На основі методологічного та математичного обґрунтування архітектури технологічних систем розроблена теплонасосна система енергопостачання, що дозволяє забезпечувати повне випаровування холодагента для надійної роботи компресора теплового насоса; узгоджувати рівень споживання теплоти з рівнем продуктивності теплового насоса при використанні теплової ємності місцевої води в повній мірі; змінювати рівень потужності компресора теплового насоса щодо економії електроенергії на основі оцінки зміни витрати пари холодагента через компресор. Використання ж інтегрованої інтелектуальної інформації як міри відтворення співвідношення виробництва та споживання енергії в інформаційному просторі: випарник – компресор та компресор – конденсатор дозволяє: не виконувати інерційні виміри параметрів теплоносіїв у випарнику та конденсаторі теплового насоса; приймати рішення на зміну витрати холодагента

у випарнику теплового насоса в залежності від температури низькопотенційного джерела енергії для його повного випаровування та забезпечення надійності компресора; узгоджувати рівень витрати холодагента у випарнику із рівнем потужності компресора щодо економного стиску пари; узгоджувати рівень подачі пари у конденсатор теплового насоса із рівнем подачі пари у випарник теплового насоса при використанні ємності води, що нагрівається, в повній мірі; не використовувати додаткові теплові насоси для глибокого охолодження низькопотенційного джерела енергії 9.

Для забезпечення обов'язкових балансів свіжої та збродженої сировини щодо отримання постійного виходу біогазу запропоновано розширити технологічну систему виробництва біогазу: додати нову динамічну підсистему – тепловий насос та блок підтримки динамічної рівноваги доповнити додатковими блоками, що прогноують відвантаження та завантаження сировини при неможливості збереження її балансу в умовах підтримки динамічної рівноваги процесу зброджування [9].

Так, на основі методологічного та математичного обґрунтування архітектури технологічних систем запропонована технологічна система акумулювання [10], що дозволяє прогнозувати зміну напруги заряду та розряду з використанням аналітичної оцінки зміни температури електроліту в порах пластин та над пластинами електроаккумулятора, що змінюється за часом раніше, ніж щільність електроліту та напруга. Використання теплової акумулюючої ємності електроліту зменшує час заряду до 30 %. На основі аналітичної оцінки зміни температури води в теплоелектроаккумуляторі впродовж заряду здобута інтегрована система зміни температури води, що нагрівається, при виконанні рішень на зміну витрати води продовж заряду. Визначено, що прийняття прогноуючих рішень на зміну рівня акумулювання теплоти за рахунок зміни витрати води, що нагрівається, надає можливість скоротити термін заряду до 30 % та додатково акумулювати якісну енергію в електроаккумуляторних батареях [10].

На основі методологічного та математичного обґрунтування архітектури технологічних систем [8] можливо запропонувати архітектуру технологічної системи виробництва та споживання біогазу, основою якої є інтегрована динамічна підсистема, що включає біогазову установку, когенераційну установку, тепловий насос, акумуляторну батарею та теплоелектроаккумулятор (рис. 1).

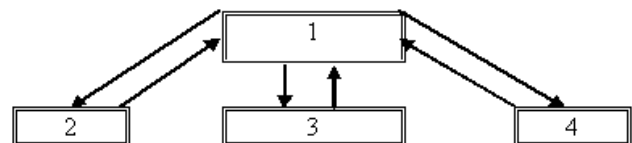


Рис. 1. Технологічна система виробництва та споживання біогазу: 1 – інтегрована динамічна підсистема (біогазова установка та тепловий насос, когенераційна установка та акумуляторна батарея, теплоелектроаккумулятор); 2 – блок заряду; 3 – блок оцінки функціональної ефективності; 4 – блок розряду

Математичне обґрунтування архітектури технологічної системи виробництва та споживання біогазу:

$$TS = \left\{ \begin{aligned} & \left[ D(P(\tau) \langle x_0(\tau), x_1(\tau), x_2(\tau), f(\tau), K(\tau), y(\tau), d(\tau) \rangle), R(\tau), P(\tau) \right), \\ & \left[ R(\tau), (P_i(\tau) \langle x_i(\tau), f_i(\tau), K_i(\tau), y_i(\tau) \rangle) \right] \end{aligned} \right\}$$

де  $TS$  – технологічна система;  $D$  – динамічна підсистема;  $P$  – властивості елементів технологічної системи;  $\tau$  – час, с;  $x$  – умови;  $f$  – параметри, що діагностуються;  $K$  – коефіцієнти математичного опису;  $y$  – вихідні параметри;  $d$  – динамічні параметри;  $R$  – відносини в  $CS$ . Індекси:  $i$  – число елементів когенераційної системи; 0, 1, 2 – початковий режим, зовнішній, внутрішній характер впливів.

Виходячи із математичного обґрунтування архітектури технологічної системи представлено інтегровану динамічну підсистему як основу технологічної системи щодо контролю працездатності й ідентифікації стану складових динамічної підсистеми на основі графа причинно-наслідкових зв'язків (рис. 2) [8].

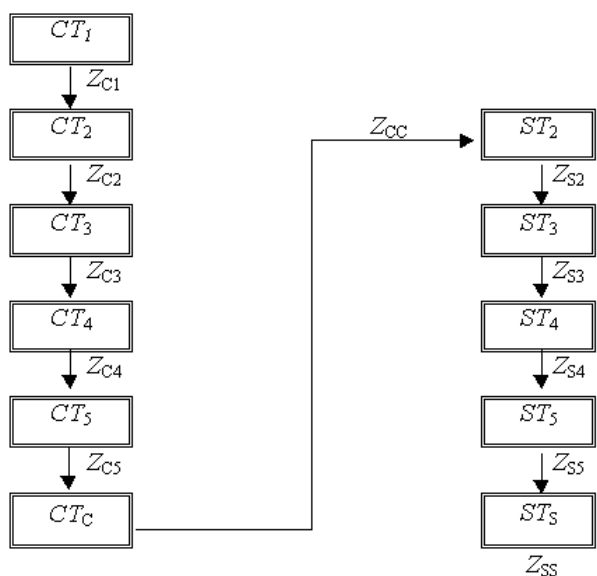


Рис. 2. Граф причинно-наслідкових зв'язків динамічної підсистеми:  $CT$  – контроль події;  $Z$  – логічні відносини;

$ST$  – ідентифікація події. Індекси: 1 – впливи;

2 – внутрішні параметри, що діагностуються;

3 – коефіцієнти рівнянь динаміки; 4 – істотні параметри, що діагностуються; 5 – динамічні параметри;  $c$  – контроль працездатності;  $s$  – стан

З використанням математичних моделей динаміки біогазової установки, випарника, компресора, конденсатора теплового насоса [9], електроаккумулятора та теплоелектроаккумулятора [10] на основі графа причинно-наслідкових зв'язків (рис. 2) виконано контроль працездатності та ідентифікацію стану біогазової установки [9], контроль працездатності та ідентифікацію стану систем: випарник – компресор, компресор – конденсатор теплового насоса [9], контроль працездатності та ідентифікацію стану електроаккумулятора та контроль працездатності та ідентифікацію стану теплоелектроаккумулятора [10] щодо здобуття підсумкової інформації на рівні прийняття рішень. На основі здобутої інформації можливо запропонувати викори-

стання інтегрованої логічної моделі – методу інтегрованого прийняття рішень щодо підтримки співвідношення виробництва та споживання електричної енергії та теплоти у складі технологічної системи виробництва та споживання біогазу.

На основі контролю працездатності та ідентифікації стану біогазової установки [9] з використанням передатної функції, що оцінює зміну температури зброджування при зміні температури теплоносія, що гріє [9], можливо отримати таку підсумкову інформацію при розряді біогазової установки, що потребує прийняття рішення на підтримку динамічної рівноваги процесу здобуття біогазу шляхом відключення секцій теплообмінника для підігріву субстрату, вбудованого в метантенк (рис. 3).

$$\begin{aligned} (CT_c(\tau)(\Delta t(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. верх.}}(\tau) < \\ < \Delta t_{\text{розр. рів.}}(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. верх.}}(\tau)) > 0). \end{aligned} \quad (1)$$

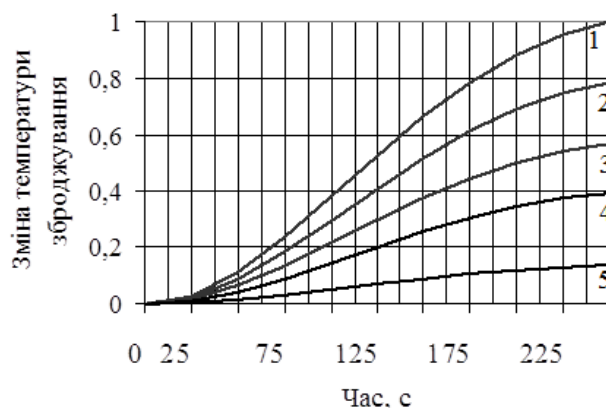


Рис. 3. Система підтримки динамічної рівноваги процесу здобуття біогазу при розряді: 1, 2, 4 – гранично припустима працездатність для верхнього, середнього та низького рівнів функціонування, відповідно; 3, 5 – розряд та ідентифікація розряду верхнього та середнього рівнів, відповідно

Для підтримки заряду когенераційної установки на основі контролю працездатності та ідентифікації стану електроаккумулятора [10] з використанням передатної функції, що оцінює зміну температури електроліту в порах пластин та над пластинами при зміні температури електроліту в об'ємі електроаккумулятора [10] можливо прийняти своєчасне рішення на заряд акумуляторної батареї (рис. 4):

$$(P(\tau)(t_e(\tau)(+))), Z_{cc}(\tau), \quad (2)$$

на основі аналітичної оцінки зміни температури електроліту в порах пластин та над пластинами при розряді [10]:

$$\begin{aligned} (CT_c(\tau)(-\Delta t(\tau) / -\Delta t_{\text{ст. розр. роз.}}(\tau) > \\ > -\Delta t_{\text{розр.}}(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. роз.}}(\tau))) \end{aligned} \quad (3)$$

Для підтримки заряду когенераційної установки на основі контролю працездатності та ідентифікації ста-



ну теплоэлектроаккумулятора [10] з використанням передатної функції, що оцінює зміну температури води, що нагрівається при зміні витрати води [10] можливо отримати таку підсумкову інформацію при заряді теплоэлектроаккумулятора:

$$(CT_c(\tau), (\Delta t(\tau) > \Delta t_{\text{розр.низ}}(\tau)), \quad (4)$$

що надає можливість підтримувати заряд теплоэлектроаккумулятора на основі інтегрованої системи зміни температури води, що нагрівається (табл. 1)

$$(P(\tau)(G_b(\tau)(+))), Z_{cc}(\tau). \quad (5)$$

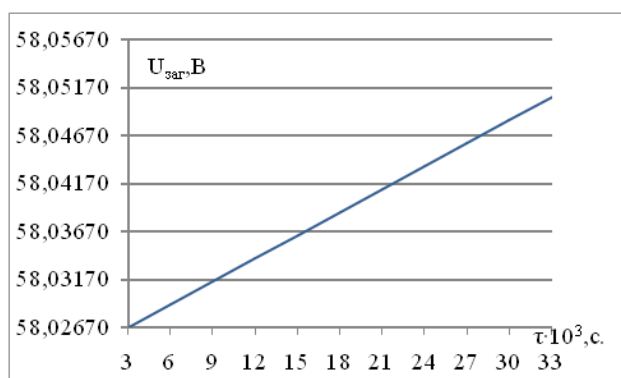


Рис. 4. Зміна загальної напруги  $U_{\text{заг.}}$  48 В впродовж часу заряду, де  $U_{\text{заг.}}$  — загальна напруга, В;  $\tau$  — час, с

Таблиця 1

Підтримка процесу заряду теплоэлектроаккумулятора

Час, $\tau$ , год., °C	1	2	3	4	5	6	7
Пуск $G_b=0,0055$ кг/с	30						
Заряд $G_b=0,0055$ кг/с		66,9	69,14				
Прийняття рішення заряд $G_b=0,0063$ кг/с				75,96	78,5	79,4	
Прийняття рішення заряд $G_b=0,014$ кг/с							82,4
Час, $\tau$ , год., °C	8	9	10	11	12	13	14
Заряд $G_b=0,014$ кг/с	84,5	86	87,1	87,9	88,5	89	89,3
Час, $\tau$ , год., °C	15	16	17	18	19	20	21
Заряд $G_b=0,014$ кг/с	89,5	89,6	89,7	89,8	89,9	90	90

Якщо після прийняття рішення на відключення секції теплообмінника, вбудованого в метантенк, при розряді біогазової установки здобуємо на основі контролю працездатності та ідентифікації стану біогазової установки [9] з використанням передатної функції, що оцінює зміну температури зброджування при зміні температури теплоносія, що гріє, таку підсумкову інформацію:

$$(CT_c(\tau)(\Delta t(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. верх.}}(\tau)) > \Delta t_{\text{розр. рів.}}(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. верх.}}(\tau)) < 1), \quad (6)$$

то для запобігання зміні напряму теплообміну виконуємо відвантаження збродженої сировини щодо використання у якості низькопотенційного джерела енергії для теплового насоса.

Для підтримки розряду когенераційної установки на основі контролю працездатності та ідентифікації стану електроаккумулятора [10] з використанням передатної функції, що оцінює зміну температури електроліту в порах пластин та над пластинами при зміні температури електроліту в об'ємі електроаккумулятора [10] можливо здобути таку аналітичну оцінку зміни температури електроліту в порах пластин та над пластинами при заряді:

$$(CT_c(\tau)(\Delta t(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. зар.}}(\tau)) < \Delta t_{\text{розр.}}(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. зар.}}(\tau))), \quad (7)$$

що потребує прийняття своєчасного рішення на розряд акумуляторної батареї (рис. 5):

$$(P(\tau)(t_e(\tau)(-))), Z_{cc}(\tau) \quad (8)$$

та надає можливість виконати підтримку системи: «випарник — компресор теплового насоса» на основі наступної підсумкової інформації:

— зміни паровмісту пари у випарнику, що здобута на основі контролю працездатності та ідентифікації стану випарника теплового насоса з використанням передатної функції, що оцінює зміну паровмісту пари холодагента при зміні витрати холодагента:

$$(CT_c(\tau)(\Delta x(\tau) / \Delta x_{\text{ст. розр.}}(\tau)) > \Delta x_{\text{розр. рів.}}(\tau) / \Delta x_{\text{ст. розр.}}(\tau))), \quad (9)$$

— зміни витрати пари через компресор, що здобута на основі контролю працездатності та ідентифікації стану компресора теплового насоса [9] з використанням передатної функції, що оцінює зміну витрати пари через компресор теплового насоса при зміні тиску[9]:

$$(CT_c(\tau)(\Delta G(\tau) / \Delta G_{\text{макс. розр. верх.}}(\tau)) < \Delta G_{\text{розр.}}(\tau) / \Delta G_{\text{макс. розр. верх.}}(\tau))). \quad (10)$$

Рішення (9), (10) дозволяють збільшити подачу холодагента у випарник теплового насоса з ціллю його повного випаровування (рис. 6):

$$(P(\tau)(G_{xl}(\tau)(+))), Z_{cc}(\tau) \quad (11)$$

та економного стиску збільшеної витрати пари (рис. 7):

$$(P(\tau)(G_{xl}(\tau)(-))), Z_{cc}(\tau). \quad (12)$$

На основі контролю працездатності та ідентифікації стану електроаккумулятора [10] з використанням передатної функції, що оцінює зміну температури електроліту в порах пластин та над пластинами при зміні температури електроліту в об'ємі електроаккумулятора

лятора [10] можливо прийняти своєчасне рішення на заряд акумуляторної батареї (рис. 4):

$$(P(\tau)(t_e(\tau)(+))), Z_{cc}(\tau), \quad (13)$$

на основі аналітичної оцінки зміни температури електроліту в порах пластин та над пластинами при розряді [10]:

$$(CT_c(\tau)(-\Delta t(\tau)/-\Delta t_{ст.розр.роз}(\tau) > -\Delta t_{розр}(\tau)/\Delta t_{ст.розр.роз}(\tau))). \quad (14)$$

Таке рішення разом з оцінкою зміни температури теплоносія, що гріє, для підтримки процесу зброджування на основі контролю працездатності та ідентифікації стану конденсатора теплового насоса [9] з використанням передатної функції, що оцінює зміну температури води, що нагрівається при зміні витрати холодагента [9] забезпечують функціонування системи компресор-конденсатор для збільшення перепуску пари холодагента в конденсатор теплового насоса (рис. 8).

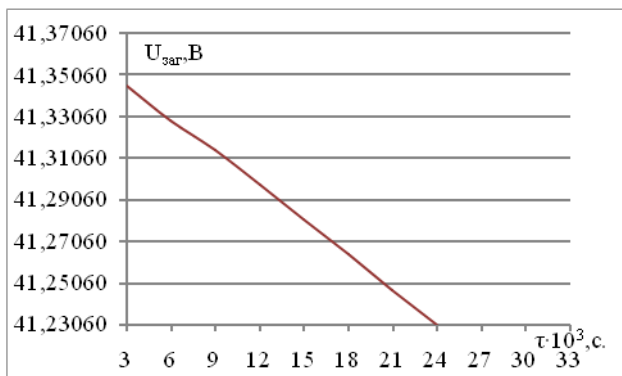


Рис. 5. Зміна загальної напруги  $U_{заг}$ . 48 В впродовж часу розряду, де  $U_{заг}$  — загальна напруга, В;  $\tau$  — час, с

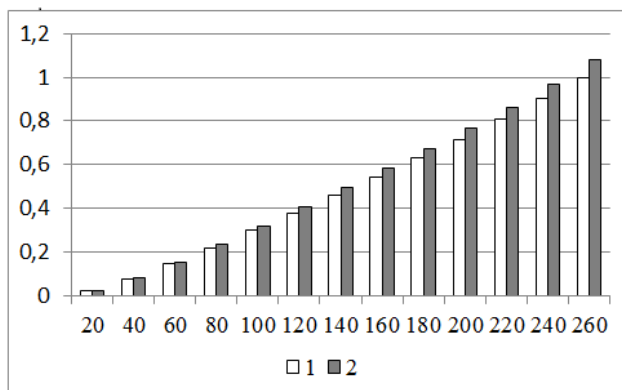


Рис. 6. Підтримка функціонування системи випарник-компресор на рівні прийняття рішень: 1 — гранично припустима працездатність випарника та ідентифікація прийняття рішення; 2 — діагностування збільшення витрати холодагента

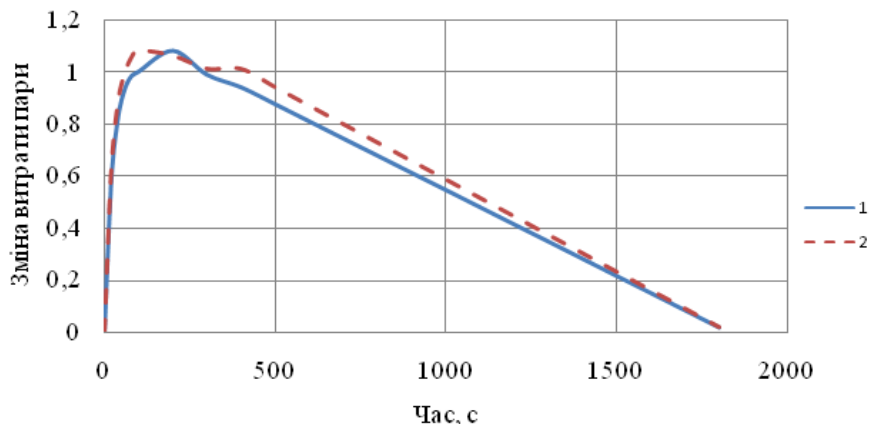


Рис. 7. Підтримка функціонування системи випарник-компресор та компресор-конденсатор на рівні прийняття рішень: 1 — діагностування зменшення витрати пари; 2 — діагностування збільшення витрати пари

Розряд системи компресор-конденсатор підтримує заряд біогазової установки щодо завантаження свіжого матеріалу з включенням секції теплообмінника для підтримки процесу зброджування за рахунок балансу потоків свіжої та збродженої сировини (рис. 9) з використанням здобутої інформації на основі контролю працездатності та ідентифікації стану біогазової установки та передатної функції щодо оцінки зміни температури зброджування при зміні витрати теплоносія, що гріє:

$$(CT_c(\tau)(\Delta t(\tau)/\Delta t_{ст.розр.верх}(\tau) > \Delta t_{розр.рів}(\tau)/\Delta t_{ст.розр.верх}(\tau), < 1)). \quad (15)$$

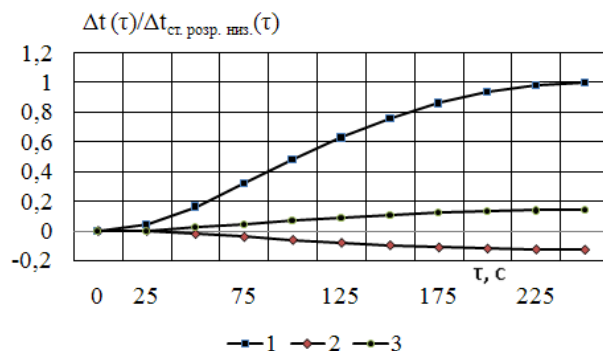


Рис. 8. Підтримка функціонування системи компресор-конденсатор на рівні прийняття рішень: 1 — гранично припустима працездатність підігріву теплоносія, що гріє; 3, 2 — прийняття рішення та його ідентифікація щодо діагностування збільшення витрати холодагента, де  $t$  — температура теплоносія, що гріє, К;  $i$  — час, с. Індекс: ст. розр. низ. — стале розрахункове значення температури теплоносія, що гріє, низького рівня функціонування

Здобуття ж підсумкової інформації (1) після відключення секції теплообмінника, вбудованого в метантенк, свідчить про продовження процесу зброджування щодо входження енергетичної системи в допуск нового рівня підтримки процесу розряду (рис. 3) та підтримує процес заряду когенераційної установки, де  $CT$  — контроль події;  $G$  — витрата речовини, кг/с;  $P$  —

властивості елементів технологічної системи;  $t$  – температура робочого тіла,  $K$ ;  $x$  – паровміст робочого тіла;  $Z$  – логічні відносини в динамічній підсистемі;  $t$  – час, с. Індеси:  $c$  – контроль працездатності;  $e$  – електроліт в об'єму електроаккумулятора; макс., розр., ст. – максимальне, розрахункове, стале значення параметра; зар., роз. – заряд, розряд; верх, низ, рів. – верхній, низький, рівень; хл – холодагент.

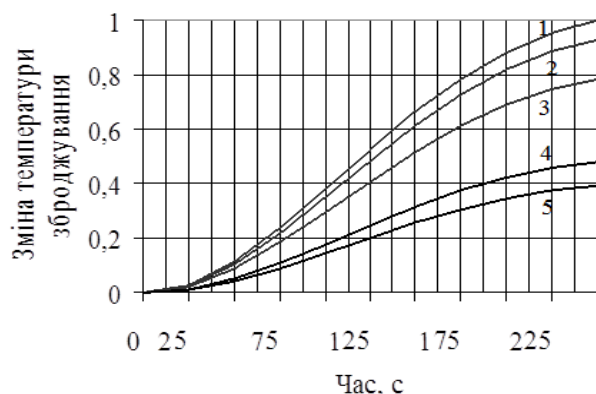


Рис. 9. Система підтримки динамічної рівноваги процесу здобуття біогазу при заряді: 1, 3, 5 – гранично припустима працездатність біогазової установки для верхнього, середнього, низького рівнів функціонування, відповідно; 4, 2 – заряд та ідентифікація заряду нижнього та середнього рівнів відповідно

## 5. Висновки

Запропонована підтримка співвідношення виробництва та споживання електричної енергії та теплоти на основі технологічної системи, основу якої складає інтегрована динамічна підсистема з використанням біогазової та когенераційної установок, теплового насоса, акумуляторної батареї та теплоелектроаккумулятора. На основі підсумкової інформації, здобутої в результаті контролю працездатності та ідентифікації стану біогазової установки, систем: випарник-компресор, компресор-конденсатор теплового насоса та контролю працездатності та

ідентифікації стану електроаккумулятора та теплоелектроаккумулятора з використанням математичних моделей динаміки біогазової установки, випарника, компресора, конденсатора теплового насоса, електроаккумулятора та теплоелектроаккумулятора розроблено метод інтегрованого прийняття рішень в умовах не збігу виробництва та споживання енергії при забезпеченні постійного виходу біогазу на основі використання збродженого сусла у якості низькопотенційного джерела енергії для теплового насоса; розроблена логічна модель.

У зв'язку із збитковістю виробництва електричної енергії в години найменшого споживання, тобто в нічні часи, когенераційні установки функціонують 6000 годин на рік. Розроблений метод інтегрованого прийняття рішень щодо підтримки співвідношення виробництва та споживання енергії дозволяє забезпечити постійний вихід біогазу, що надає можливість додаткового використання когенераційної установки до 2000 годин на рік. На основі прогнозування зміни параметрів технологічного процесу виробництва та споживання біогазу можливо приймати попереджувальні рішення на підтримку процесу зброджування, що дозволяє виконувати своєчасне відвантаження збродженої та завантаження свіжої сировини. В умовах забезпечення постійного виходу біогазу та відсутності витрат виробленої теплоти на підтримку процесу зброджування можливо, підтримуючи заряд когенераційної установки, акумулювати вироблену енергію не тільки для забезпечення функціонування компресора теплового насоса, а й в години збиткового виробництва електроенергії щодо підтримки розряду когенераційної установки. Такий підхід дозволяє підвищити товарність біогазової установки та знизити собівартість виробництва електроенергії до 10–15 % з урахуванням сервісного обслуговування теплового насоса та електроаккумуляторів. Економія біогазу, наприклад, при зброджуванні 60,2 т/добу сировини складає 49,4 тис.м<sup>3</sup>/рік, що дає річне зниження викидів двоокису вуглецю 75,6 т/рік. Більш того, відходи анаеробного зброджування можуть бути використані не тільки як низькопотенційне джерело енергії для теплового насоса, а й у якості добрива, що відповідає умовам охорони оточуючого середовища.

## Література

1. Железная, Т. А. Перспективы производства электрической энергии из биомассы в Украине [Текст] / Т. А. Железная, Е. Н. Олейник, А. И. Гелетуца // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 6. – С. 67–75.
2. Ратушняк, Г. С. Интенсификация теплообмена та термостабилизация биореакторов [Текст] / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 2. – С. 26–31.
3. Ратушняк, Г. С. Автоматичне управління в системах біоконверсії [Текст] / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 6. – С. 116–121.
4. Ратушняк, Г. С. Моделювання нестационарних режимів теплообміну в біогазових реакторах [Текст] / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, К. В. Анохіна // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – № 2. – С. 142–145.
5. Мазуренко, А. С. Эксергетические характеристики биогазовых установок [Текст] / А. С. Мазуренко, А. Е. Денисова, А. А. Климчук, Нго Минь Хиеу, П. А. Котов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 1, № 8 (67). – С. 7–12.
6. Горобець, В. Г. Ексергетичний аналіз ефективності енергетичних систем для комплексного виробництва електричної та теплової енергії з використанням поновлювальних джерел енергії [Текст] / В. Г. Горобець, Б. Х. Драганов // Відновлювальна енергетика. – 2010. – № 3 (22). – С. 5–12.

7. Колесниченко, Н. В. Использование бака-аккумулятора для регулирования нагрузок мини-ТЭЦ [Текст] / Н. В. Колесниченко, М. Ю. Водолазская // Наукові праці Донецького національного технічного університету . – 2011. – № 10(180). – С. 67–72.
8. Чайковская, Е. Е. Оптимизация энергетических систем на уровне принятия решений [Текст] / Е. Е. Чайковская // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 7. – С. 169–173.
9. Чайковська, Є. Є. Інтегрована технологічна система виробництва біогазу [Текст] / Є. Є. Чайковська // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 4, № 8 (64). – С. 31–34.
10. Чайковська, Є. Є. Підтримка акумулювання на рівні прийняття рішень [Текст] / Є. Є. Чайковська // Вісник НТУ "ХПІ". Серія "Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування". – 2013. – № 14 (988). – С. 127–133.

*У роботі наведено аналіз застосовуваних індексів стабільності використовуваних для контролю водно-хімічних режимів оборотних систем охолодження ТЕС та АЕС. Досліджено спектр контрольованих показників циркуляційної і додаткової води при довгостроковій експлуатації різних водно-хімічних режимів на масштабних моделях і промисловому об'єкті з оціночним контролем ефективності ведення ВХР по товщині відкладень на теплообмінній поверхні конденсаторів і інтенсивності корозії на контрольних зразках*

**Ключові слова:** індекси стабільності, хімічний контроль, водно-хімічний режим, оборотна система охолодження, швидкість відкладень

*В работе приведен анализ применяемых индексов стабильности используемых для контроля водно-химических режимов оборотных систем охлаждения ТЭС и АЭС. Исследованы контролируемые показатели циркуляционной и добавочной воды при долгосрочной эксплуатации различных водно-химических режимов на масштабных моделях и промышленных объектах с оценочным контролем эффективности ведения ВХР по толщине отложений на теплообменной поверхности конденсаторов и интенсивности коррозии на контрольных образцах*

**Ключевые слова:** индексы стабильности, химический контроль, водно-химический режим, оборотная система охлаждения, скорость отложений

УДК 621.187.16

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ХИМКОНТРОЛЯ ВОДНО- ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОБОРОТНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

**В. А. Кишневский**

Доктор технических наук, профессор\*

E-mail: twf.onpu@gmail.com

**В. В. Чиченин**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: ch-v-v@yandex.ru

\*Кафедра технологии воды и топлива

Одесский национальный

политехнический университет

пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044

## 1. Введение

На действующих АЭС с реакторами ВВЭР сложилась крайне неблагоприятная ситуация вызванная неэффективными водно-химическими режимами (ВХР) оборотных систем охлаждения (ОСО). Устаревшие нормативные документы по ведению ВХР ОСО и химическому контролю за процессами приводит к серьёзным проблемам в этой области [1, 2].

Даже невысокие значения бикарбонатной щелочности в охлаждающей воде ( $1...1,5 \text{ мг-экв/дм}^3$ ) сопровождаются отложениями на ТПК слоя карбонатных солей толщиной  $0,3...0,5 \text{ мм/год}$ , что более чем в три раза снижает коэффициент теплопередачи и на 15 % увеличивает гидравлическое сопротивление. В свою очередь, рост отложений на ТПК сопровождается ро-

стом давления в конденсаторе. Увеличение давления в конденсаторе на 1 кПа снижает мощность энергоблока на  $1,2...1,5 \%$  [3].

Неплотности конденсаторов приводят к неконтролируемому присосам охлаждающей воды во второй контур с непрогнозируемыми отложениями на теплообменных поверхностях парогенераторов, что влечет за собой необходимость не реже одного раза в 2...4 года проводить трехэтапные отмывки парогенераторов, стоимость которых составляет приблизительно 1 млн. грн. [4].

В связи со значительным количеством заглушенных неплотных трубок конденсаторов стоит вопрос о замене конденсаторов АЭС Украины, не выработавших проектный ресурс.

Применяемые в настоящее время ВХР ОСО не в состоянии предотвратить указанные проблемы [5–7].